

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет України  
”Київський політехнічний інститут”

# **ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВІТРОВОГО ПОТОКУ**

## **Методичні рекомендації**

до виконання комп’ютерного практикуму  
для студентів напряму підготовки «Теплоенергетика»  
спеціальності «Енергетичний менеджмент»

Київ  
НТУУ «КПІ»  
2015

Визначення характеристик вітрового потоку [Текст]: метод. рек. до викон. комп'ютерного практикуму для студ. напряму підготовки 6.050601 «Теплоенергетика» спеціальності 7.05060105, 8.05060105 «Енергетичний менеджмент» / Уклад: В.І. Шкляр, В.В. Дубровська – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 31 с.

Рекомендовано вченою радою  
Інституту енергозбереження та енергоменеджменту, НТУУ „КПІ”  
(Протокол № 6 від 26 січня 2015 р.)

Навчальне видання

## **Визначення характеристик вітрового потоку**

### **Методичні рекомендації**

до виконання комп'ютерного практикуму  
для студентів напряму підготовки «Теплоенергетика»  
спеціальності «Енергетичний менеджмент»

Укладачі: В.І. Шкляр, канд. техн. наук, доц.  
В.В. Дубровська, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний  
редактор В.І. Дешко, д-р. техн. наук, проф.

Рецензент А.М. Ковальчук, канд. техн. наук, доц.

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Мета роботи.....	5
2 Основні теоретичні відомості .....	5
2.1 Характеристики вітру .....	5
2.2 Максимальні швидкості вітру .....	9
2.3 Повторюваність швидкостей та напрямків вітру. Дифе- ренціальний розподіл та статистична функція Вейбулла..	10
2.4 Вітрові енергетичні ресурси регіону .....	14
2.5 Виробництво вітрової електроенергії.....	17
3 Опис комп'ютерної програми та послідовність виконання роботи.....	20
Контрольні запитання .....	29
Список рекомендованої літератури.....	30
Додаток.....	31

## ВСТУП

Характерною ознакою сучасної енергетики України є рух в напрямку розвитку екологічно чистих технологій на основі нетрадиційних поновлювальних джерел енергії (ПДЕ).

Одним з найбільш поширених напрямів освоєння ПДЕ є використання енергії вітру.

Виробництво електроенергії вітроенергетичними установками (ВЕУ) сприяє зменшенню обсягів споживання органічного палива та викидів в атмосферу шкідливих речовин, що утворюються при його спалюванні.

Для успішної роботи необхідно правильно аналізувати природні і економічні умови та технічні можливості для використання енергозберігаючих технологій, до яких відноситься також використання нетрадиційних і поновлюваних джерел енергії.

Залучення енергії від ПДЕ в енергобаланс країни є перспективним напрямком в підвищенні енергозабезпечення регіонів.

Методичні рекомендації до виконання комп'ютерного практикуму з дисципліни «Комбіновані системи з поновлюваними джерелами енергії» розроблені для студентів напряму підготовки «Теплоенергетика» спеціальності «Енергетичний менеджмент».

# **1 МЕТА ТА ОСНОВНІ ЗАВДАННЯ РОБОТИ**

Мета роботи – засвоєння практичних методів визначення кліматичних характеристик вітроенергетичних ресурсів в заданій місцевості.

Основні завдання роботи:

- 1) знаходження основних кліматичних характеристик вітру;
- 2) проведення статистичного аналізу отриманих даних;
- 3) визначення енергетичного потенціалу вітру.

## **2 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ**

### **2.1 Характеристики вітру**

Для ефективного використання енергії вітру необхідно мати вичерпну інформацію про його характеристики.

При аналізі вітроенергетичного потенціалу місцевості складається вітроенергетичний кадастр, який являє собою районовану систему чисельних характеристик режиму вітру.

Вітроенергетичний кадастр - це сукупність об'єктивно достовірних і необхідних кількісних відомостей, які характеризують вітер, як джерело енергії. За матеріалами багаторічних спостережень у кадастрі представлені в табличній або графічній формі всі харак-

теристики вітру (рис1).

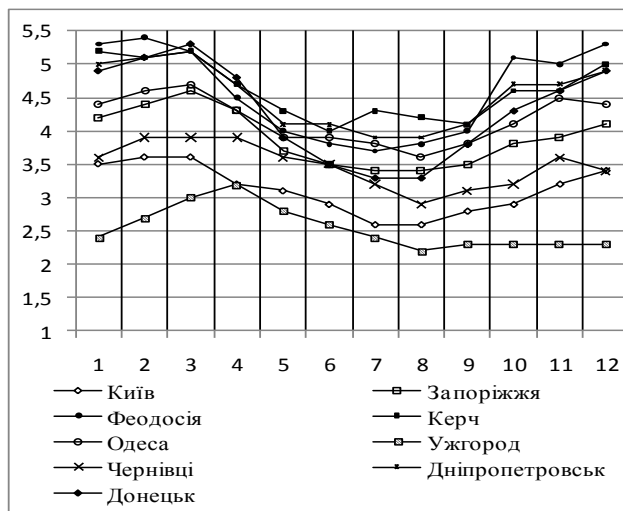


Рис. 1 Середньомісячні швидкості вітру  $u$  протягом року для міст України.

До числа основних кадастрових характеристик вітру належать:

- середньорічна швидкість вітру;
- річний і добовий хід вітру;
- повторюваність швидкостей вітру;
- повторюваність напрямків вітру;
- розподіл за тривалістю вітрових періодів і періодів його відсутності;
- максимальна швидкість вітру;
- питома потужність і питома енергія вітру;
- вітроенергетичні ресурси району.

Основним джерелом вихідних даних для розробки вітроенергетичного кадастру є спостереження за швидкістю вітру гідрометеослужби. Ці спостереження, проводяться кілька разів на добу, охоплюють періоди в десятки років і являють собою величезний фактичний матеріал. Їх перевагою є те, що вони проводяться за єдиною методикою, а місця (майданчики) виконання спостережень класифіковані за ступенем їх відкритості на місцевості.

На основі систематичних вимірів швидкості вітру визначена характеристика вітру і проведено районування території України.

Сумарна площа, на якій доцільно отримувати електричну енергію від вітроустановок, становить близько 20% території.

**Середньорічні швидкості вітру.** Дані про середньорічні швидкості вітру слугують вихідною характеристикою загального рівня інтенсивності вітру. За величиною середньорічної швидкості вітру в першому наближенні можна судити про перспективність застосування вітроенергетичних установок в тому чи іншому районі. Однак необхідно мати на увазі, що швидкість вітру залежить від рельєфу місцевості, шорсткості поверхні, наявності затінюючих елементів, висоти над поверхнею землі. Для зіставлення середніх швидкостей вітру їх необхідно приводити до порівнянних умов: відкрита рівнинна місцевість та висота 10 м від поверхні землі.

Майже у всіх кліматичних зонах України вітровий потенціал зростає із збільшенням висоти щодо показника на рівні 10 - метрової позначки:

- На висоті 30 м - в 1,5 рази;
- На висоті 60 м - в 2 рази;
- На висоті 100 м - в 2,5 рази.

При цьому енергетичний потенціал вітру на одній і тій же висоті в районах Криму і Карпат в 2,5 .3 рази вище, ніж в північній зоні; енергетичний потенціал південних регіонів України значно вище, ніж північних.

Середньорічна швидкість вітру **u** на висоті установки **h** вітродеви́гуна визначається за відомою формулою:

$$u_{cp} = u_{10} \left( \frac{h}{10} \right)^b,$$

де **u**<sub>10</sub>- стандартна швидкість вітру, виміряна на висоті 10 м від поверхні землі; **b** - параметр, змінюється в залежності від закритості місцевості, часу доби, пори року; для відкритої місцевості **b** = 0,14.

Для наочності і зручності практичного використання дані про середні багаторічні швидкості наносять на карту.

Середні швидкості вітру істотно змінюються протягом доби, місяця і сезону. Відповідно до цього розрізняють добовий, місячний, сезонний і річний хід швидкості вітру.

**Річний хід вітру** являє собою сезонну зміну середніх швидкостей вітру.

**Добовий хід вітру** являє собою зміну середніх швидкостей вітру протягом доби. Найчіткіше він простежується в літній час і мало проявляється взимку. Влітку швидкості вітру в денні години в се-



редньому на 1,5 - 2,0 м/с вище, ніж вночі. В умовах зниження загального рівня інтенсивності вітру в літній час денний максимум швидкостей вітру є сприятливим для ефективного використання енергії вітру, оскільки саме в денні години, як правило, спостерігається підвищена потреба в енергії споживачами.

## **2.2 Максимальні швидкості вітру**

Відомості про максимальні швидкості вітру є важливою складовою частиною вітроенергетичного кадастру. Вони необхідні для виконання розрахунків на міцність окремих вузлів та елементів вітроенергетичних установок (башти, лопатей, пристроїв орієнтації на вітер і ін.). Помилка у визначенні максимальних швидкостей може привести або до зайвого запасу міцності й збільшення ваги конструкції ВЕУ, або навпаки, до створення недостатньо міцних установок, наслідком чого може бути їх руйнування.

Визначення максимальної швидкості базується на результатах спостережень за минулий час і являє собою по суті прогноз на майбутнє. У прикладній кліматології про максимальну швидкість вітру прийнято говорити як про швидкість, можливу один раз на задане число років.

## 2.3 Повторюваність швидкостей та напрямків вітру.

### Диференціальний розподіл та статистична функція Вейбулла

Повторюваність швидкостей вітру показує, яку частину часу протягом аналізованого періоду дули вітри з тією чи іншою швидкістю. За допомогою цієї характеристики виявляється енергетична цінність вітру і знаходяться основні енергетичні показники, що визначають ефективність і доцільність використання його енергії.

Обробка даних регулярних спостережень показує, що річний (місячний) розподіл густини вірогідності частоти повторюваності швидкостей вітру може бути з достатньою точністю описано диференціальним розподілом або статистичною функцією Вейбулла. Використання цих функцій дає можливість більш точно оцінити очікувану потужність вітрового потоку, вірогідність виникнення необхідної швидкості та тривалість робочої швидкості вітру у певному напрямку.

Аналіз характеристик вітру за диференціальним розподілом полягає в математичній обробці масиву експериментальних даних, а при використанні статистичної функції Вейбулла - за середнім значенням швидкості вітру, що скорочує необхідність в великій кількості вимірів швидкостей вітру.

Функція розподілу Вейбулла має вигляд:

$$\Phi u = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} \exp \left[ -\left(\frac{u}{c}\right)^k \right], \text{ для } 1 < k < 10,$$

де  $\Phi u$  – густина ймовірності повторення швидкості зі значенням  $u$ ;  $u$  – значення швидкості вітру що цікавить, м/с;  $c$  – масштабний коефіцієнт визначається за виразом:

$$c = \frac{\bar{u}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)},$$

де середня швидкість вітру визначається за формулою:

$$\bar{u} = \frac{\sum_{i=1}^n u_i}{n},$$

де  $u_i$  – поточні значення швидкостей вітру, отримані в результаті метеорологічних спостережень за деякий період часу, м/с;  $n$  – загальна кількість спостережень за той же період часу;  $\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$  – гамма-функція,  $k$  - коефіцієнт форми розподілу Вейбулла, який характеризує асиметрію кривої і визначається:

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{u}}\right)^{-1,086},$$

де  $\sigma$  – середньоквадратичне відхилення швидкості вітру, що визначається за виразом:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n u_i^2}{n} - \left(\frac{\sum_{i=1}^n u_i}{n}\right)^2}.$$

Таблиця гамма-функції -  $\Gamma(x)$  для діапазону  $1 \leq x \leq 2$  наведено у додатку. При розрахунках у випадках, якщо  $x > 2$  використовується властивість гамма-функції:

$$\Gamma(x + 1) = x\Gamma(x).$$

Гарна відповідність експериментальним даним виходить при значеннях параметра  $k = 1,8 - 2,3$  і параметра  $c$ , близького до значення середньої швидкості вітру.

На рис. 2. показані аналітичні криві повторюваності швидкостей вітру при різних значеннях середньорічної швидкості (від 4 до 12 м / с). Площа під кожною з наведених кривих однакова, вона дорівнює 100% (або 8760 годин за рік).

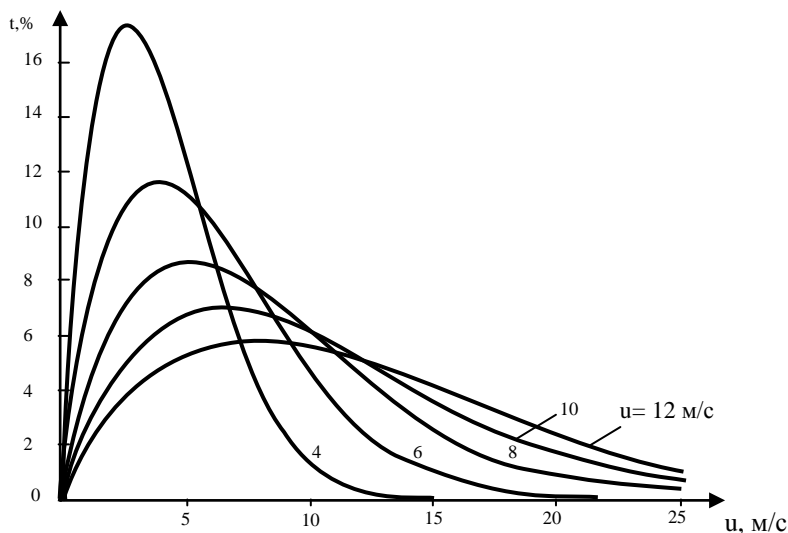


Рис. 2 Криві повторюваності швидкостей вітру при різних середньорічних швидкостях.

Повторюваність напрямків вітру показує, яку частину часу протягом аналізованого періоду (місяця, року) дули вітри того чи іншого напрямку (рис.3). Правильний облік напрямків вітру грає важливу роль у визначенні оптимального розташування вітроустановок на місцевості.

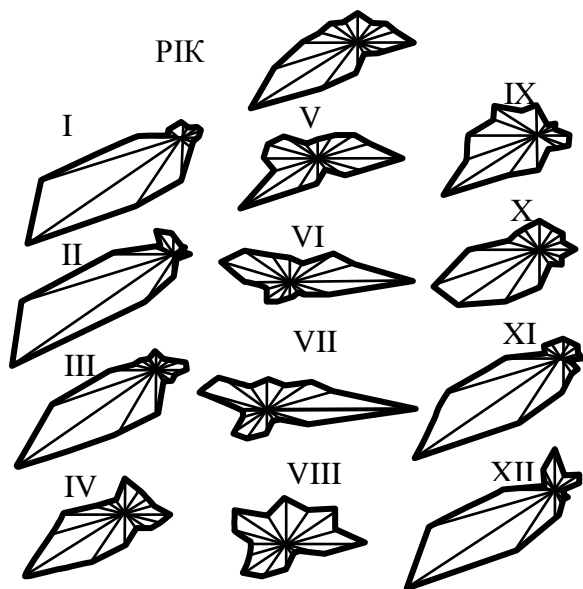


Рис. 3 Приклад річної і місячної рози вітрів.

При вивченні повторюваності напрямків вітру необхідно мати на увазі, що з енергетичної точки зору важливіше знати не тільки переважний напрямок вітру, але і енергетичну цінність вітру (можливе виробництво електричної енергії) по кожному напрямку. Для

оцінки цього проводять розрахунки можливого виробництва енергії ВЕУ за кожним напрямом і будують відповідні рози можливого виробництва енергії ВЕУ по кожному напрямку виробництва (рис. 4).

В залежності від пори року роза вітрів і домінуючий напрямок вітру зазнають суттєвих змін.

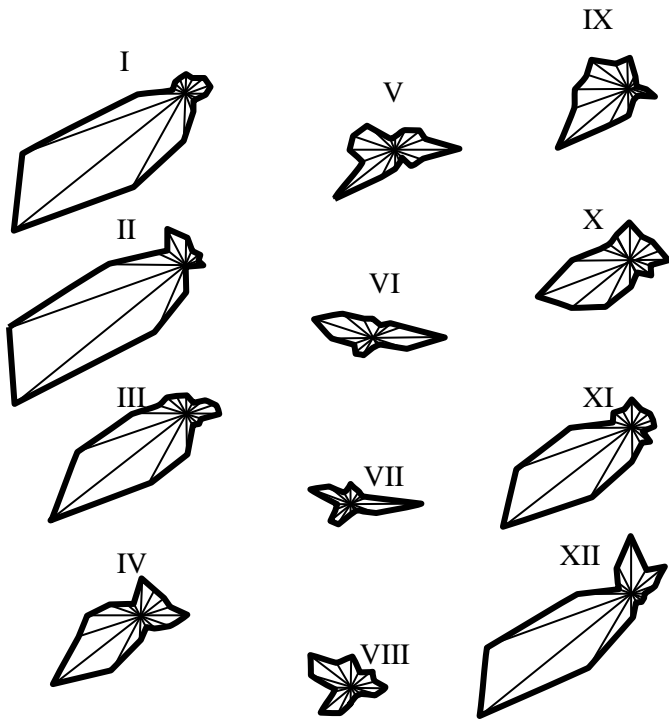


Рис. 4 Місячне виробництво електроенергії ВЕУ з урахуванням рози вітрів.

## 2.4 Вітрові енергетичні ресурси регіону

Потужність вітрового потоку пропорційна густині повітря, площі поперечного перерізу потоку і швидкості вітру в третьому ступені. В силу кубічної залежності від швидкості вітру потужність є вкрай непостійною величиною, що змінюється в широких межах.

Середньорічна питома енергія вітру (енергія, що проходить за рік крізь  $1 \text{ м}^2$  поперечного перерізу) є інтегральною (осередненою) характеристикою. Вона залежить ще й від повторюваності швидкостей вітру, тобто від того, яку частину року дув вітер з тією чи іншою швидкістю.

На рис. 5 показано, як формується річна сума питомої енергії вітру (площа під кривою  $W_{\text{ПІТ}}$ ) при середньорічній швидкості вітру. Через кубічну залежність потужності від швидкості вітру найбільший внесок дають не швидкості, які найбільш часто спостерігаються і навіть не середні, а швидкості, що перевищують останні в 1,7-1,9 рази.

Дана розбіжність має суттєвий вплив на вибір потужності вітрогенератора та прийняття інших технологічних рішень щодо роботи енергосистеми. Вона зумовлена використанням емпіричних формул та коефіцієнтів.

Правильне встановлення напрямків вітру відіграє важливу роль у визначенні оптимального розміщення вітроустановок на місцевості.

При наявності даних про середньорічні швидкості вітру, верти-

кальний профіль вітру, а також про повторюваність швидкостей вітру, можна дати енергетичну характеристику вітрового потоку в будь-якому пункті.

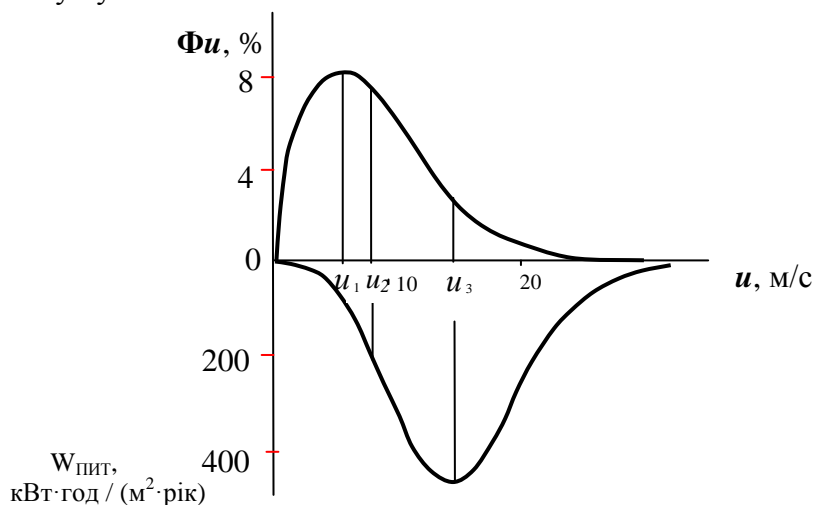


Рис. 5 Повторюваність швидкостей вітру  $\Phi u$  і розподіл річної питомої енергії  $W_{\text{пит}}$ ,

$u_1$  – швидкість, яка найбільш часто спостерігається;

$u_2$  – середня швидкість вітру;

$u_3$  – швидкість, що забезпечує найбільший внесок у річне виробництво енергії.

Згідно теорії ідеального вітроколеса в корисну роботу може бути перетворена лише частина енергії, що проходить через перетин вітроколеса. Максимум корисної енергії оцінюється коефіцієнтом використання енергії вітру  $\eta_{\text{max}} = 0,593$ . В даний час у кращих зразків вітчизняних і іноземних вітроколес цей параметр досягає значень 0,45-0,48.

Крім того, як показує практика, існуючими конструкціями ВЕУ



повністю використовується не весь діапазон швидкостей вітру. При швидкостях вітру нижче мінімальної, робочої потужності вітроколеса не вистачає навіть на подолання сил тертя в вузлах БЕУ. В діапазоні швидкостей від мінімальної робочої до розрахункової, при якій БЕУ розвиває встановлену потужність, використання енергії вітру здійснюється найбільш повно. При подальшому посиленні вітру аж до максимальної робочої швидкості потужність БЕУ підтримується на постійному рівні завдяки роботі регулюючих пристроїв. Нарешті, при швидкостях вітру вище максимальної робочої, з метою уникнення руйнування, БЕУ виводиться з роботи.

## 2.5 Виробництво вітрової електроенергії

Потужність, що розвивається вітродвигуном, залежить від швидкості вітру, потужності вітрового потоку, типу вітродвигуна і його аеродинамічної характеристики. Найбільш повно вітровий потік використовується горизонтально-осьовим пропелерним двигуном, для якого уся площа потоку, яку охоплює вітроколесо, є активною.

Потужність вітрового потоку, що проходить через деякий перетин  $S$  дорівнює його кінетичній енергії в одиницю часу

$$P_0 = \frac{m \cdot u^2}{2} = \frac{\rho \cdot S \cdot u \cdot u^2}{2} = \rho \cdot \frac{u^3}{2} \cdot S,$$

де:  $m$  – маса повітря, що проходить крізь переріз вітроколеса в секунду;

$\rho$  – густина повітря,  $1,3 \text{ кг/м}^3$ ;

$S$  – площа, яку охоплює вітроколесо,  $\text{м}^2$ .

Питома потужність, що виробляється вітроустановкою, розраховується за формулою,  $\text{Вт/м}^2$  :

$$P = \frac{\rho \cdot u^3}{2} \cdot C_p = \frac{P_0}{S} \cdot C_p,$$

де  $C_p$  – коефіцієнт використання потужності вітрового потоку вітродвигуном, або просто коефіцієнт потужності вітродвигуна:

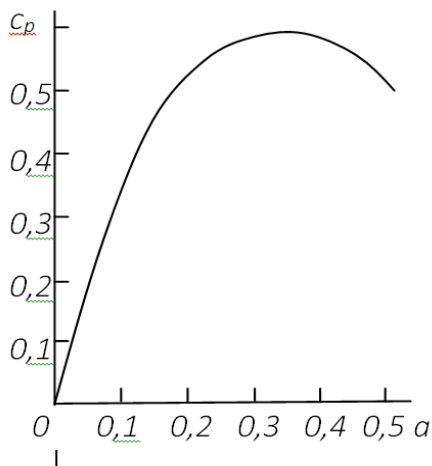
$$C_p = 4a(1-a)^2,$$

де  $a$  – коефіцієнт гальмування вітрового потоку – відносне зменшення швидкості потоку при проходженні вітроколеса:

$$a = \frac{u - u_1}{u},$$

де  $u$  – швидкість потоку вітру, який набігає на вітроколесо,  $u_1$  – швидкість потоку вітру, що проходить через вітроколесо.

Для горизонтально-осьових вітродвигунів, що використовують підйомну силу, коефіцієнт потужності має найбільше значення  $C_p = 0,59$  при  $a = 1/3$ . Практично досяжні значення коефіцієнта  $C_p \approx 0,3 \div 0,4$ .

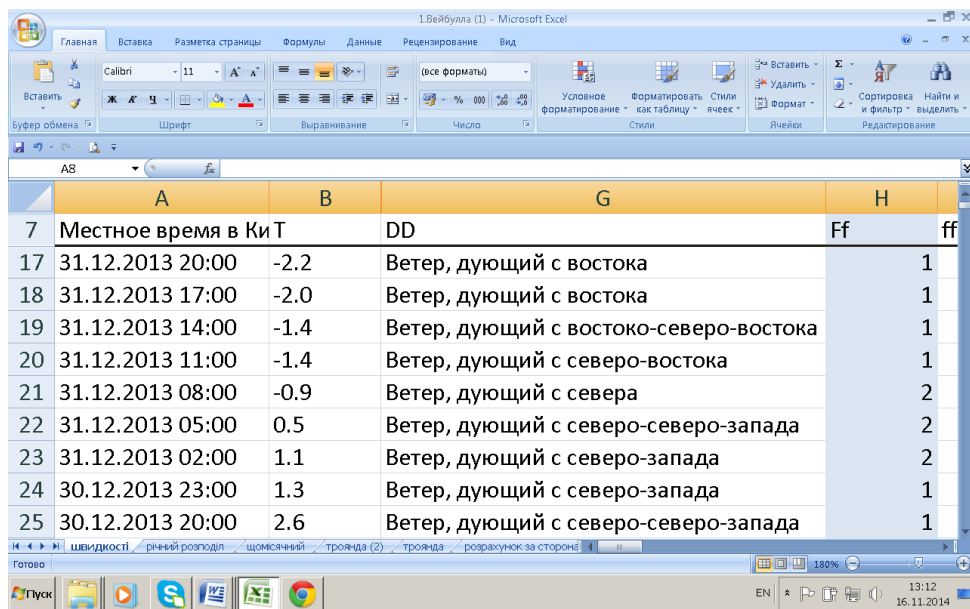


Потужність, що виробляється вітроустановкою, відрізняється від потужності, яку створює вітроколесо, на величину втрат при перетворенні утилізованої енергії вітру в корисну енергію.

Вибір потужності ВЕУ визначається електричним навантаженням електроспоживачів, які використовуються в розглянутому об'єкті, при цьому слід враховувати, що всі вони практично ніколи не включаються одночасно. Тому розрахунок ведеться за середніми показниками електроспоживання. Крім цього, споживання електроенергії залежить і від часу доби. Наприклад, в нічний час доби енергоспоживання, як правило, знижується, а робота вітроустановки триває. Таким чином, слід передбачити акумулюючі установки, що дозволяють накопичувати енергію в період зниження споживання і далі використовувати накопичену енергію в період пікових навантажень.

## 3 ОПИС КОМП'ЮТЕРНОЇ ПРОГРАМИ ТА ПОСЛІДОВНІСТЬ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Всі розрахунки зручно виконувати в програмному середовищі EXCEL. Для цього розроблена програма розрахунку для визначення характеристик вітрового потоку та вибору вітроенергетичної установки.



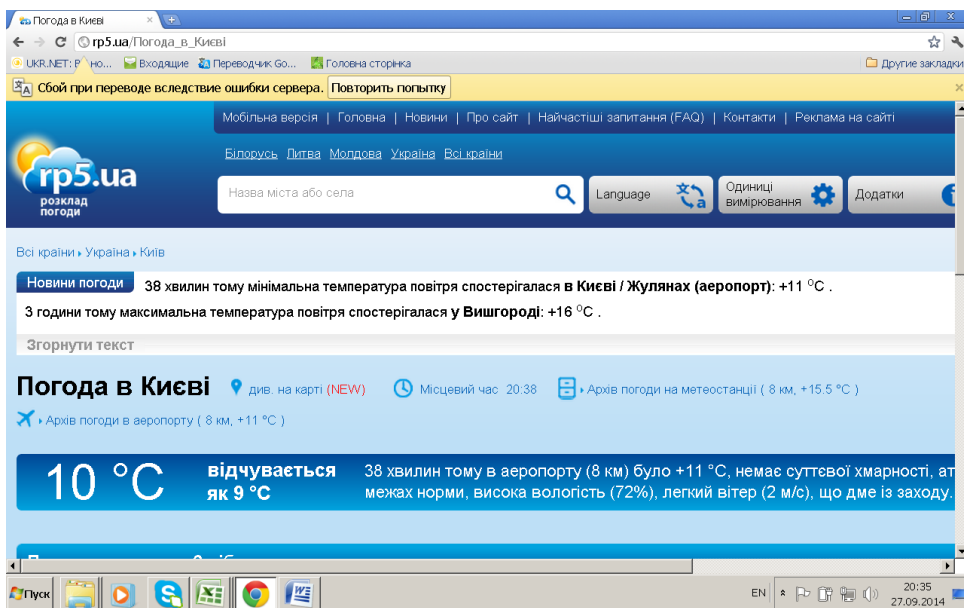
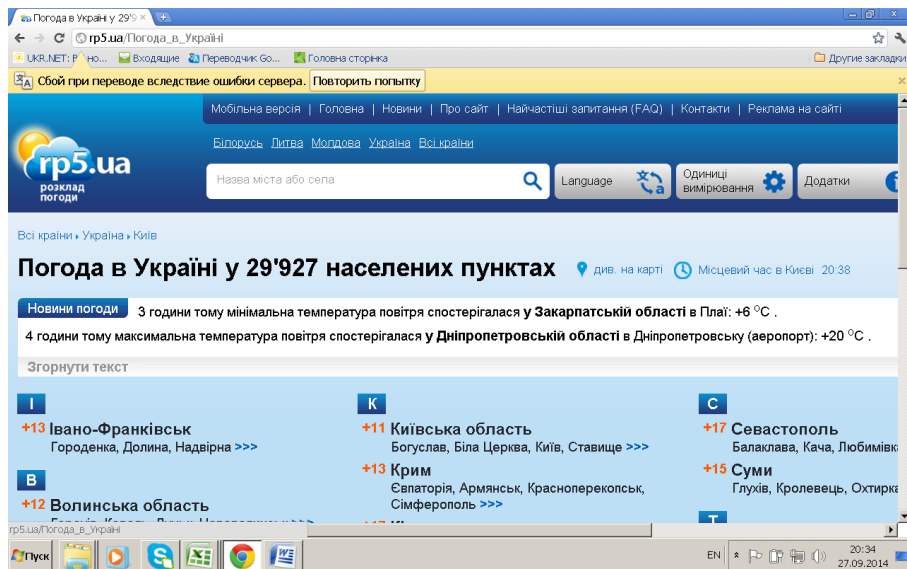
The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet titled "1.Вейбулла (1) - Microsoft Excel". The spreadsheet contains a table with the following data:

	A	B	G	H
7	Местное время в КиТ		DD	Ff
17	31.12.2013 20:00	-2.2	Ветер, дующий с востока	1
18	31.12.2013 17:00	-2.0	Ветер, дующий с востока	1
19	31.12.2013 14:00	-1.4	Ветер, дующий с востоко-северо-востока	1
20	31.12.2013 11:00	-1.4	Ветер, дующий с северо-востока	1
21	31.12.2013 08:00	-0.9	Ветер, дующий с севера	2
22	31.12.2013 05:00	0.5	Ветер, дующий с северо-северо-запада	2
23	31.12.2013 02:00	1.1	Ветер, дующий с северо-запада	2
24	30.12.2013 23:00	1.3	Ветер, дующий с северо-запада	1
25	30.12.2013 20:00	2.6	Ветер, дующий с северо-северо-запада	1

Першим етапом виконання роботи є визначення швидкостей вітру для даної місцевості: Для цього необхідно з сайту «[tr5.ua](http://tr5.ua)» вибрати швидкості для даної місцевості, провести деякі зміни у наступній послідовності:

1. Відкрити в Інтернеті WEB-сайт "Розклад Погоди" «[tr5.ua](http://tr5.ua)».

## 2. Обрати країну (позиція 1) та місто (позиція 2).



### 3. Увійти в «Архів погоди на метеостанції».

Архів погоди в Києві / Жулянх (аеропорт) див. на карті Архів погоди в аеропорту (20:00)

Прогноз погоди

метеостанція (WMO ID) 33345 з 1 лютого 2005

Дивитися архів погоди Завантажити архів погоди Статистика погоди

Кінцева дата періоду: 27.09.2014 Період вибірки: ☒ 1 доба ☐ 7 діб ☐ 30 діб Вибрати

Для отримання пояснень наведіть курсор миші на відповідний заголовок

Дата / Місцевий час	T	Po	P	Pa	U	DD	Ff	ff10	ff3	N	WW	W1	W2	Tn	Tx	Cl	Nh	H
---------------------	---	----	---	----	---	----	----	------	-----	---	----	----	----	----	----	----	----	---

### 4. Натиснути клавішу «Завантажити архів погоди» та встановити діапазон зміни вітру (наприклад, 2013 рік):

- «Діапазон дат» - **01.01.2013р. -31.12.2013р.**;
- «Для заданого діапазону вибрати»: **всі дні**;
- «Кодування» **ANSI**.

Сбой при переводе вследствие ошибки сервера. Повторить попытку

метеостанція (WMO ID) 33345 з 1 лютого 2005

Дивитися архів погоди Завантажити архів погоди Статистика погоди

1. Діапазон дат: 01.01.2013 — 31.12.2013

2. Для заданого діапазону вибрати: ☒ всі дні ☐ тільки місяць Вересень ☐ тільки дату 27 вересня

3. Кодування: ☒ ANSI ☐ UTF-8 ☐ Unicode Вибрати в файл CSV.GZ Завантажити

5. **«Вибрати файл CSV GZ»**

6. Натиснути клавішу **«Вибрати файл CSV GZ»**, а потім **«Завантажити»** та скачати файл  
«33345.01.01.2013.31.12.2013.1.0.0.ua.ansi.000000000» з даними погоди.
7. Після відкриття видалити з файлу рядки 1-6 та колонки: D, E, F, I – AC.
8. У колонках прийняті наступні позначення:
- T – температура повітря на висоті 2 м над поверхнею землі, °C;
  - DD, Ff – напрямок (румби) та швидкість вітру на висоті 10 - 12 м над поверхнею землі, осереднені за 10 хв., що безпосередньо передували терміну спостереження;
9. При відкритті файлу у колонці B (температури повітря) можлива зміна значень за рахунок їх форматування. Помилки можна змінити враховуючи: 01.09.2014 відповідає значенню 1,9, а 01.03.2014 – 1,3.
10. Отримані та скореговані дані необхідно перенести до файлу **«Розрахунок характеристик вітру»**

Порядок обробки результатів вимірювань наступний [6]:

1. Результати вимірювань швидкості вітру  $u_i$ , м/с, об'єднуються в групи з інтервалом  $\Delta u = 1$ . Визначається загальне число вимірювань N.

2. Оскільки вимірювання швидкості можуть проводитися на висоті  $h_i$ , а для оцінки енергетичного потенціалу потрібна швидкість вітру  $u$  на висоті  $h$  передбачуваної установки вітротурбіни, визначення швидкості вітру на висоті  $h$  виконується за допомогою залежності:

$$u = u_i \left( \frac{h}{h_i} \right)^{\frac{1}{5}},$$

де  $h$  визначається з попередніх розрахунків (якщо відомий діаметр колеса вітроагрегату).

3. Визначається величина ймовірного розподілу швидкості вітру:

$$\Phi u = \frac{Nu_i}{N},$$

де  $Nu_i$  - число вимірів в  $i$ -ому швидкісному інтервалі.

Будується залежність  $\Phi u = f(u)$ . Добуток  $\Phi u \Delta u$  може бути інтерпретовано як частина часу року, протягом якого швидкість вітру має значення в інтервалі від  $u_i$  до  $u_i + \Delta u$ .

4. Середнє значення швидкості вітру  $\bar{u}$ , м/с, визначається співвідношенням:

$$\bar{u} = \frac{\sum_{i=1}^n u_i}{n}.$$

5. Визначається ймовірність  $\Phi u > u'$  появи вітру зі швидкістю



$u_i$ , більшої деякої заданої швидкості  $u'$ , для чого складаються ймовірності всіх швидкісних інтервалів, в яких  $u_i > u'$ . Ймовірність  $\Phi u > u'$  може бути інтерпретована як частина часу року, протягом якого вітри дмуть зі швидкістю  $u_i$ , більшою  $u'$ .

Заповнюється таблиця та будується залежність  $\Phi u = f(u)$  (рис.6) і роза вітрів (рис.7).

u	dN/du	$\Phi_u$	$\Phi_{u>u'}$	$\Phi_u \cdot u$	$u^3$	$\Phi_u \cdot u^3$	$P_u$	$P_u \cdot \Phi_u$	P
м/с	(м/с) <sup>-1</sup>	(м/с) <sup>-1</sup>			(м/с) <sup>3</sup>	(м/с) <sup>2</sup>	Вт/м <sup>2</sup>		
0									
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									

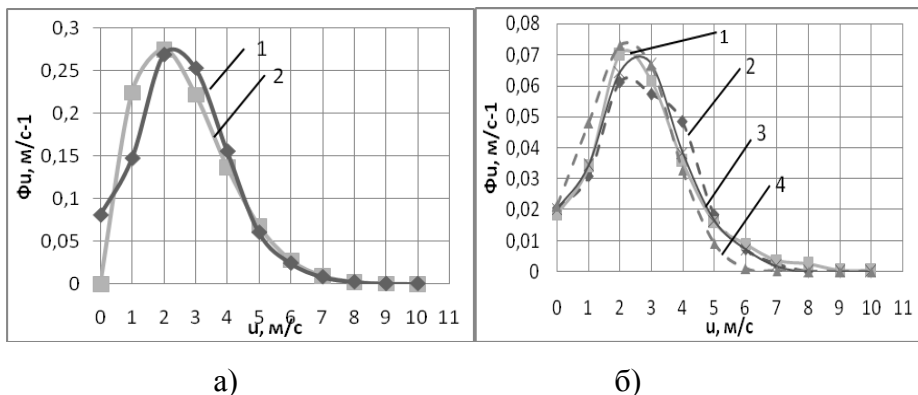


Рис. 6 Функція розподілу повторюваності швидкості вітру:

а) річна функція розподілу швидкості вітру:

1 - диференціальний розподіл; 2 - розподіл за функцією Вейбулла;

б) функція розподілу швидкості вітру за сезонами:

1 - весна; 2 - зима ; 3 - осінь; 4 - літо.

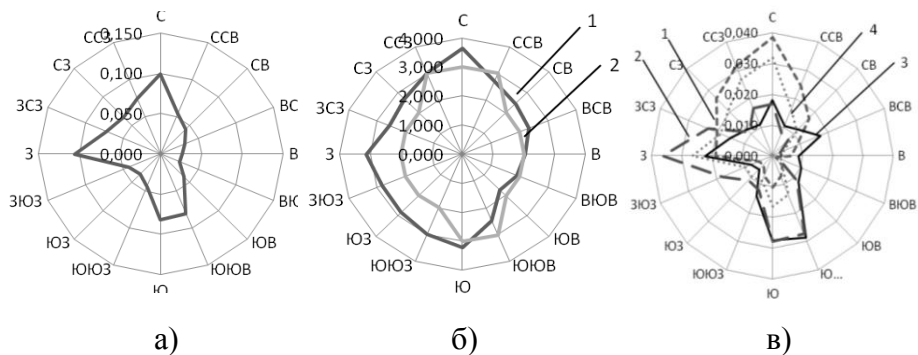


Рис. 7 Роза вітрів для м. Києва:

а) повторюваність напрямків швидкостей вітру;

б) 1- середньорічні швидкості за напрямками;

2 - найбільш вірогідні швидкості для повторення у даному напрямку;

в) роза вітрів повторюваності напрямків вітру за сезонами:

1- літо, 2- зима, 3 – весна, 4- осінь.

6. Потужність вітрового потоку одиничного перерізу  $P_u$ , Вт/м<sup>2</sup>, визначається:

$$P_u = \frac{\rho \cdot u^3}{2}.$$

Добуток  $P_u \Phi_u$  являє собою функцію розподілу енергії вітру. Будується залежність  $P_u \Phi_u = f(u)$ .

7. Будується залежність  $P_u = f(\Phi_u > u')$  (рис.8), яка дозволяє визначити ймовірність очікування вітрового потоку заданої потужності.

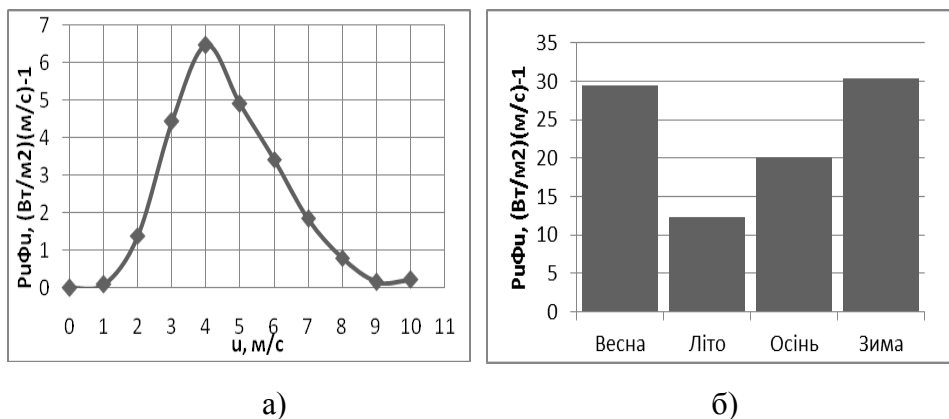


Рис. 8 Розподіл енергії вітру.

- річна функція розподілу енергії вітру від його швидкості;
- сумарне значення функції розподілу енергії вітру за сезонами.

Після виконання розрахунків проводиться аналіз отриманих результатів. Зазвичай акцентуються наступні моменти:

- Побудувати графічні залежності:

- Середньомісячні швидкості вітру  $u$  протягом року для певного міста України (див. рис.1).
- Річну та сезонні функції розподілу повторюваності швидкості вітру  $\Phi u = f(u)$  за функцією Вейбулла та диференціальним розподілом (див. рис.6).
- Річну і місячні рози вітрів (див. рис.7).
- Річний та сезонний розподіл питомої енергії вітру  $Pu\Phi u = f(u)$  (див. рис.8).

2. Користуючись побудованою залежністю  $\Phi u = f(u)$ , необхідно порівняти середнє значення швидкості вітру з найбільш імовірним значенням швидкості вітру в даній місцевості, а також з розрахунковою швидкістю, прийнятою для проектування ВЕУ ( $u = 10 - 12$  м/с).

3. За допомогою побудованої залежності  $Pu\Phi u = f(u)$ , визначається значення швидкості при якій функція розподілу енергії вітру має максимум і порівнюється з найбільш ймовірним значенням швидкості вітру в даній місцевості.

До звіту входять: мета роботи, необхідні теоретичні відомості, роздруковані графіки та розрахунки.

## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Дати визначення вітру.
2. Що таке коефіцієнт використання встановленої потужності і від чого він залежить?
3. Як побудувати розу вітрів певної місцевості?
4. Чому дорівнює коефіцієнт використання енергії вітру?
5. Як побудувати криву повторюваності швидкостей вітру?
6. Що таке вітроенергетичний кадастр?
7. Як проводяться спостереження за швидкістю вітру?
8. Дати визначення річної та середньої швидкостей вітру?
9. Де використовуються дані про середньорічні швидкості вітру?
10. Що показує повторюваність швидкостей вітру ?
11. Які аналітичні залежності використовуються при розрахунках енергетичних характеристик вітру?
12. Для чого використовуються відомості про максимальні швидкості вітру?
13. На які типи поділяються вітроенергетичні установки?
14. Як визначити потужність вітроустановки?

## **Список рекомендованої літератури**

1. Харитонов В.П. Автономные ветроэнергетические установки. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 280 с.
2. Ветроэнергетика / Пер. с англ. под ред. Я.И. Шефтера ; под ред. Д. де Рензо. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 272с.
3. Безручко К.В., Губин С.В. Автономные наземные энергетические установки на возобновляемых источниках энергии. Харьков: Нац. Аэрокосм. Ун-т «Харьк. Авиац. Ин-т», 2007. – 310с.

Таблица 9.

## Гамма-функция

х	$\Gamma(x)$	х	$\Gamma(x)$	х	$\Gamma(x)$	х	$\Gamma(x)$
1	1	1,26	0,9044	1,52	0,88704	1,78	0,92623
1,01	0,99433	1,27	0,9025	1,53	0,88757	1,79	0,92877
1,02	0,98884	1,28	0,9002	1,54	0,88818	1,8	0,93138
1,03	0,98355	1,29	0,89904	1,55	0,88887	1,81	0,93408
1,04	0,97844	1,3	0,89747	1,56	0,88964	1,82	0,93685
1,05	0,9735	1,31	0,896	1,57	0,89049	1,83	0,93969
1,06	0,96874	1,32	0,89464	1,58	0,89142	1,84	0,94261
1,07	0,96415	1,33	0,89338	1,59	0,89243	1,85	0,94561
1,08	0,95973	1,34	0,89222	1,6	0,89352	1,86	0,94869
1,09	0,95546	1,35	0,89115	1,61	0,89468	1,87	0,95184
1,1	0,95135	1,36	0,89018	1,62	0,89592	1,88	0,95507
1,11	0,9474	1,37	0,88931	1,63	0,89724	1,89	0,95838
1,12	0,94359	1,38	0,88854	1,64	0,89864	1,9	0,96177
1,13	0,93993	1,39	0,88785	1,65	0,90012	1,91	0,96523
1,14	0,93642	1,4	0,88726	1,66	0,90167	1,92	0,96877
1,15	0,93304	1,41	0,88676	1,67	0,9033	1,93	0,9724
1,16	0,9298	1,42	0,88636	1,68	0,905	1,94	0,9761
1,17	0,9267	1,43	0,88604	1,69	0,90688	1,95	0,97988
1,18	0,92373	1,44	0,88581	1,7	0,90864	1,96	0,98374
1,19	0,92089	1,45	0,88566	1,71	0,91057	1,97	0,98768
1,2	0,91817	1,46	0,8856	1,72	0,91258	1,98	0,99171
1,21	0,91558	1,47	0,88563	1,73	0,91467	1,99	0,99581
1,22	0,91311	1,48	0,88575	1,74	0,91683	2	1
1,23	0,91075	1,49	0,88595	1,75	0,91906		
1,24	0,90852	1,5	0,88623	1,76	0,92137		
1,25	0,9064	1,51	0,88659	1,77	0,92376		

